

A felszín alatti vízáramlás modellezése Budapest tágabb területén

Poyanmehr ZAHRA

e-mail: poyan@freemail.hu

Groundwater flow model of thermal karst system of Budapest, Hungary

Abstract

The purpose of this work is to construct a numerical flow model, which provides basic information required as a first step, to make a decisions related to management of the Budapest karst system. In this study, long term hydrological and hydrodynamic's data of close to hundred observation and abstraction wells and springs were used for steady state modelling of the region. In this study the flow system was simplified to two aquifer systems, the uncovered shallow aquifer and the semi-covered karst aquifer, which are separated by a Palaeogene–Neogene aquitard complex layer. The applied model successfully characterised the recharge, discharge and zonebudget conditions and the main flow paths of the area. The Visual Modflow Pro software was applied to simulate the model.

Keywords: conceptual model, karst system, thermal water, zonebudget

Összefoglalás

A tanulmány célja, a budapesti karsztos hévizekre készült számos hidrogeológiai, hidraulikai mérés és értékelés alapján a felszín alatti áramlási útvonalak jellemzésére egy elfogadható, kalibrált stacionáris állapotú modellt készíteni. A terület áramlási modelljében leegyszerűsítve két külön víztartó modellréteget — talajvíztartó és karsztvíztartó — határoztunk meg, mely a két víztartó modellréteg között vastag, rossz vízvezető, paleogén–neogén komplex réteg helyezkedik el. Így elkülönül a mély áramlású karsztvízrendszer a sekély vízáramlási (talajvíz)-rendszerrel. A hévízrendszer áramlási viszonyainak tisztázása, a vízszintekre és a vízhozamokra kalibrált értékelése megtörtént. Az elvégzett értékelések alapján tisztázott a terület karsztrendszerében kialakuló áramkép, tehát a betáplálási, megcsapolási és vízháztartási viszonyok. A munka elkészítéséhez a Visual Modflow Pro program került alkalmazásra.

Tárgyszavak: koncepcióális modell, karszt rendszer, termásvíz, zonebudget

Előzmények

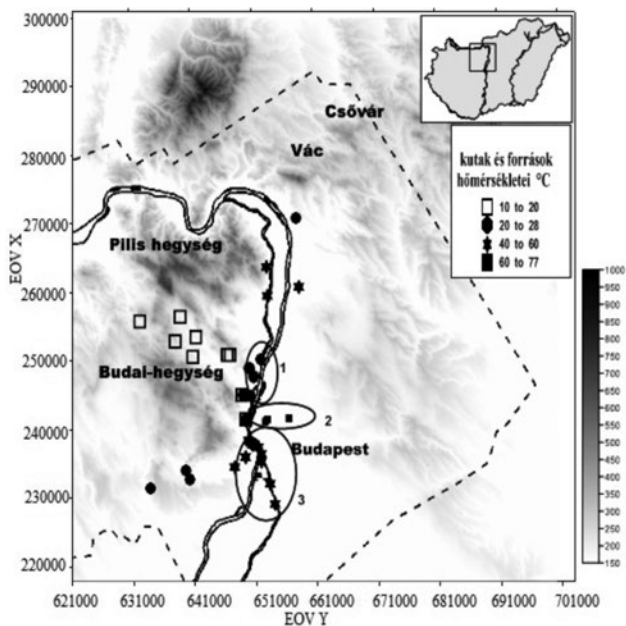
A terület első, regionális kiterjedésű, hidrodinamikai modellje közel 35 éve vált ismertté (HEINMANN & SZILÁGYI 1977, KOVÁCS et al. 1979). E modell Fortran IV. nyelvű programmal készült, a szénhidrogéntelepek 2D-s modelljeinek módosításával. A vízáramlást leíró differenciálegyenlet megoldásánál a véges-differencia módszerét alkalmazták. Később az Országos Vízföldtani Modell (OVM) fejlesztése keretében a főkarsztvíztárolóra vonatkozó ún. DKH modell első változatát a VITUKI-ban alakították ki. CSEPREGI (In: ALFÖLDI & KAPOLYI 2007) az 1951–2005 időszakra tovább fejlesztette a területről korábban készült

egyszerű 2D, esetenként kétréteges numerikus modellt, mely célja elsősorban a csapadék-beszívargások, bányászati vízemelések és más víztermelések időben változó hatásainak értékelése volt. E feladatokhoz a hidrosztratigráfiai egységek térbeliségének kezelése másodlagos volt. Az általam kialakított 3D permanens (steady-state) modell a vízminőségi, vízgeokémiai viszonyok jobb térbeli értékeléséhez járul hozzá. Továbbá, a területet érintő beavatkozások hatásait (kedvezőtlen vagy javító hatások) első lépésben képes vizsgálni. Természetesen e munka keretében ezek a hatásvizsgálatok még nem végezhetők el, azonban az itt kialakított modell segítséget nyújthat a megfelelő kérdések megfogalmazásához.

A terület földrajzi–földtani ismertetése

A tanulmányozott terület a Dunántúli-középhegység északkeleti része, a legfontosabb felszíni vízfolyása a Duna. Földrajzilag a Budai (Budapesti) termálkarszt a Budai-hegység, a Pilis és a Vác–Csóvári-rögök területéhez tartozik. A területen több mint 100 hévforrás (65–77 °C ig), illetve hévízkút található (1. ábra)

Budapest területén a termálvizek hőmérsékleti és geokémiai tulajdonságai alapján három kiáramlási zónát lehet meghatározni (ALFÖLDI et al. 1968): ezek a langyos vizet adó északi zóna, Óbuda–Rómaifürdő–Csillaghegy–Békásmegyér térségi források, kutak; a melegebb vizet adó déli zóna, Gellért, Rudas és Rácz fürdők forrásai, kútjai (ALFÖLDI 1981, SÁRVÁRY 1995); valamint a közepső zóna. Itt a Margitszigeti és a városligeti kutak vonalában a két tároló érintkezik, és a langyos vizek keverednek a meleg vizekkel.



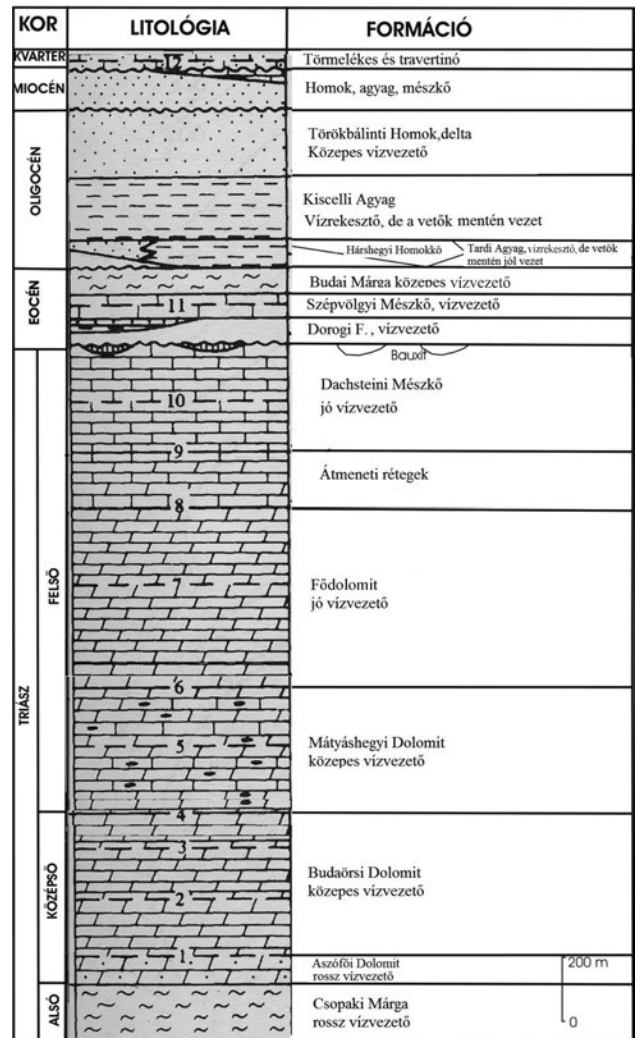
1. ábra. A vizsgált terület domborzati térképe, hévforrásai és hévízkútjai (EOV koordináták mentén), a szaggatott vonal az aktív modell határa

A termálvizek hőmérsékleti és geokémiai tulajdonságai alapján elkülönített három kiáramlási zóna, 1 – Északi zóna; 2 – Középső zóna; 3 – Déli kútsoport

Figure 1. Relief map of study area with thermal springs and wells, coordinates are in EOY (Hungarian National Coordinate System); broken line shows the boundary of the active model domain

Numbers of the encircled areas 1-3 represent the three main discharge zones along the Danube river, characterised by different temperature and geochemical properties. 1 – Northern, 2 – Central, 3 – Southern discharge zones

A kutatási terület karsztvízföldtani szempontból legjelentősebb kőzetcsoportja a nagy vastagságúra becsülhető, triász és annál fiatalabb korú karbonátos kőzetek, amelyek a főkarsztvíztározót alkotják (2. ábra). A triász rétegekre közvetlenül eocén, vagy oligocén képződmények települtek (Szépvölgyi Mészkö, Budai Márga, Kiscelli Agyag, Tardi Agyag és Hárshegyi Homokkő), amely a krétától eocénig tartó üledékhiányra, a terület hosszantartó kiemelkedésére utal (HAAS 1994, MAGYARI 1996, MINDSZENTY szerk. 2013, FODOR et al. 1994). Pliocéntól a terület fokozatos kiemel-



2. ábra. A Budai-hegység és tágabb környezete elvi rétegsora; 1-12 számok a paleokarszt határát, illetve a területen bekövetkezett süllyedések és emelkedések hatására kialakult 12 barlangi horizontot mutatja (KORPÁS nyomán 1998)

Figure 2. Synthetic stratigraphic chart of the Buda Hills, showing the main palaeokarszt and cave system horizons (1-12), which resulted in uplifting and subsidence of the region (modified after KORPÁS 1998)

kedésével szárazulattá vált, mely a triász–eocén kőzetek felszínre kerüléséhez és a mai felszín alatti áramlási rendszer kialakulásához vezetett. A területen bekövetkezett süllyedések és emelkedések hatására 12 barlangszint (2. ábra) alakult ki (KORPÁS 1998). A területen található legfiatalabb üledékek a Budai-hegységben az édesvízi mészkövek (KORPÁS 1981, KELE et al. 2011), valamint a lösz, a hegységi lejtőtörmelékek és a Duna bevágódásához és árteréhez kötött üledékek (MINDSZENTY szerk. 2013).

A terület hidrológiája

A területen csak meteorikus eredetű vizek cirkulálnak, melyek az utánpótlódási területeken beszivárogva és különböző mélységekbe lejutva eltérő mértékben melegednek fel. A mélybe áramló víz hőt von el a környezetéből, és a feláramlás során ezt a hőt hévforrások formájában a felszínre

juttatja. Ez a hőelvonás és hőhozzáadás a geotermikus gradiensben is érzékelhető területi különbségeket okoz (LORBERER 1984).

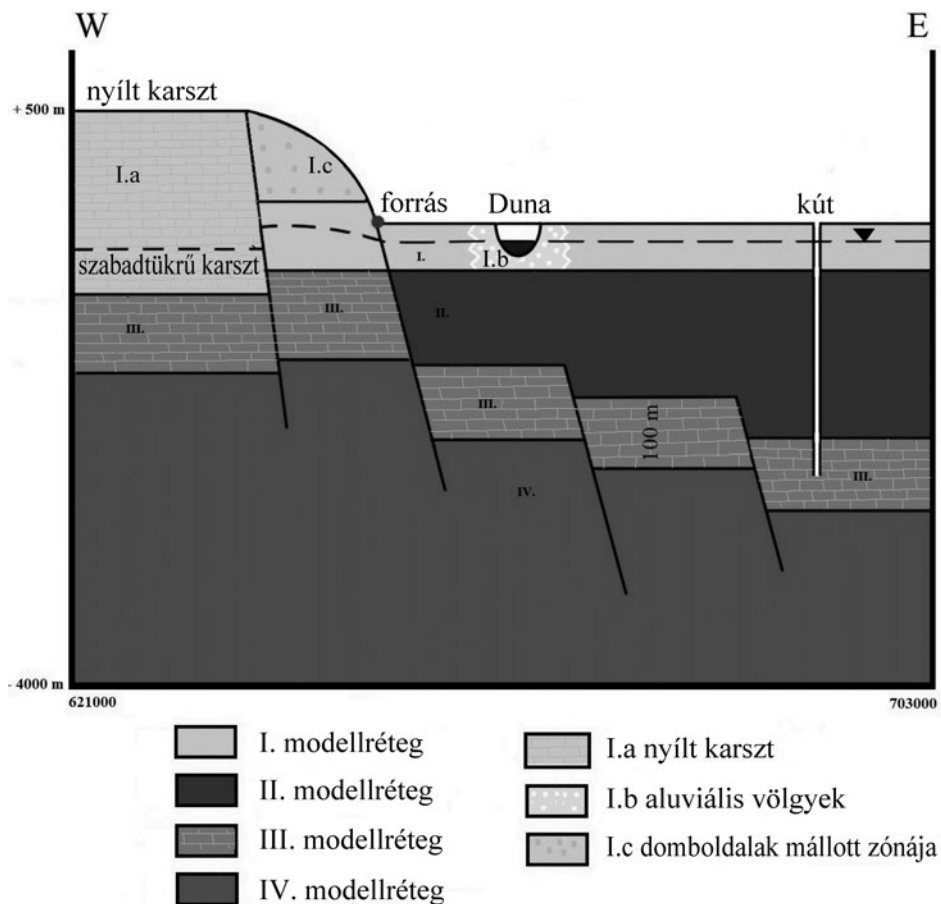
A kutatási területen a felszín alatti víz áramlásának legfontosabb hajtó ereje a gravitáció. Az így kialakuló áramlás nem csak a tengerszint feletti magasság különbségéből, hanem az eltérő hőmérsékletű vizek különböző sűrűségéből is adódik (hidrodinamikus vezérlésű geotermikus áramlási rendszer) (ALFÖLDI 1981). Azaz a kémiai összetételbeli különbség és földtani folyamatok (tektonika, kompresszió) által indukált potenciálkülönbség hatására is kialakul áramlás.

További kutatások során a Rózsadomb és Gellért-hegy környezetében újabb koncepcionális modellt lehetett felállítani a két megcsapolódási zóna folyamataira és termékeire, amely alátámasztja a keveredés lehetőségét a középső zónában a Rózsadomb környékén és a hidrotermális vizek megcsapolódását a déli zónában a Gellért-hegynél (ERŐSS et al. 2008a, b; 2012).

A koncepcionális modell kialakítása

A vízföldtani modell kialakítása a koncepcionális modell megfogalmazásával kezdődik. A koncepcionális modell követi a területről az irodalom által ismert „alááramlási elmélet” egyszerűsített fizikai modelljét, mely szerint az utánpótlódási területeken beszivárgó csapadékvíz a terület monoklinális szerkezete miatt a vízrekesztő agyagos összeletek alá kerül, majd felmelegedve visszafordul és a hegységperemen a felszín felé áramlik (SCHAFARZIK 1928; VENDEL & KISHÁZI 1964; ALFÖLDI 1979, 1981; KOVÁCS & MÜLLER 1980). Az említett áramlási elmélet alapján a koncepcionális modell kialakításához a következő négy főbb rétegcsoporthoz (hidrosztratigráfiai egységet vagy modellréteget) különítettem el, melyek egymástól vízföldtani tulajdonságai, szerepük és helyzetük alapján jelentősen különböznek (3. ábra).

Az I. modellréteg: A hegyvidéki, dombvidéki és síkvidéki talajvizek zónája, mely tartalmazza a nyílt karszt karsztvízszint alatti 25 méteres zónáját, a vízzáró rétegekből



3. ábra. Vízföldtani modellrétegek, I. – a talajviztartó zóna és a nyíltkarszt terület (talajvíz tarzó réteg); II. – a vízzáró félig átérésztő paleogén és neogén rétegcsoporthoz; III. – a karsztrendszer felső 100 méteres zónája (főkarszt réteg) és; IV. – az „üde” karszt, ami a karsztrendszer fekéjéig terjed

Figure 3. Hydrostratigraphic units of the conceptual model; Ist model layer: the shallow unconfined aquifer (including the uncovered carbonate rocks in the highland); IInd model layer: the Palaeogene-Neogene aquitard sediment complex. IIIrd model layer: the upper 100m of the fractured and karstified carbonate sediments (semi-confined aquifer or main karst system); IVth not karstified, fresh carbonate rocks

álló domboldalak mállott zónáját és az alluviális völgyek vízvezető képződményeit.

A II. modellréteg: A karsztrendszer és a talajvizek közötti paleogén és neogén nagy vastagságú vízzáró, illetve félig átteresztő rétegek, amelyek elkülönítik a két víztartó összletet. Ezek az oligocén Kiscelli Agyag és, Hárshegyi Homokkő, továbbá miocén homokos és agyagos képződmények. (lásd a 2. ábra).

A III. modellréteg: A karsztrendszer felső, jobb vízvezető zónája (főkarszt), mely magába foglalja a nyomás alatti karsztterületeken a karsztrendszer felső 100 méteres zónáját, a nyílt karszt területén a karsztvízszint alatti 25–100 méteres zónát. A következő formációk karsztosodott mállott rétegei alkotják ezt a modellréteget a triász Fődolomit, Dachsteini Mész, az eocén Szépvölgyi Mész és Budai Márga (lásd 2. ábra).

A IV. modellréteg: A karsztrendszer alsó, kevésbé, vagy nem karsztosodott, rosszabb vízvezető, „üde” zónája. Ez a réteg a karsztrendszer fekéjéig terjed, meghatározása földtani megfontolások és irodalmi adatok alapján becsült.

A vizsgálatba vont terület térbeli és mélységi lehatárolása

A terület határait a karsztrendszer határáig lehetne megadni, ezek, mint áramlásmentes határok („no-flow boundary”) a modellezés szempontjából kedvezőek lennének. Azonban a terület nagysága megnehezítette volna egy részletes modell felépítését, így a Dunántúli-középhegység fő karsztvízáramlási rendszerén belül egy kisebb területet választottam ki, az alábbi EOY koordináták mentén:

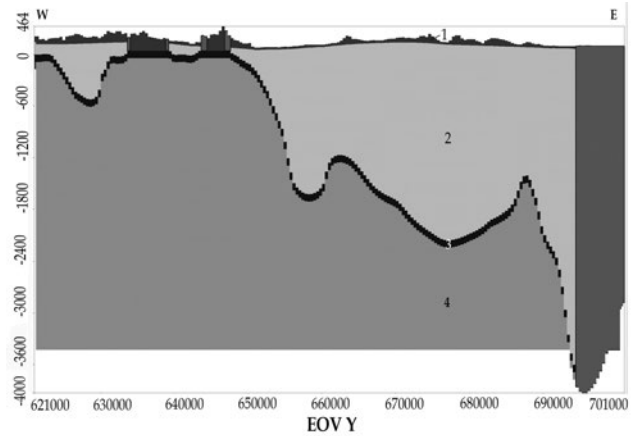
Délnyugati sarokpont koordinátái: EOY X = 621 000; EOY Y = 218 000

Északkeleti sarokpont koordinátái: EOY X = 703 000; EOY Y = 302 000

A karbonátos alaphegység domborzati térképe alapján a legelső karsztosodott egység a felszín alatti 4000–5000 méterig terjedhet (HAAS 1988). Ezért a modellezett térrész vertikálisan a +500 és –4000 méteres tartományt öleli fel.

Modell geometriája

A terület áramlási rendszerének modelljében leegyszerűsítve két külön víztartó modellréteget — talajvíztartó és karsztvíztartó — határoztam meg (4. ábra). A két víztartó modellréteg között vastag, rossz vízvezető, paleogén–neogén komplex réteg helyezkedik el. Az első modellréteg felszíne az 1:50 000 topográfiai térkép alapján lett beépítve. Az első modellréteg alja párhuzamos a szerkesztett talajvízszinttel, amely az egyréteges homogén modell futtatásának az eredményeiből készült. A második, a főkarszt modellréteg felszínének felépítésére, illetve a jó vízvezető karbonátos kőzetek és a vízrekesztő paleogén–neogén fedő elkülönítésére az 1:200 000 Dunántúli-középhegység fekéjéi térképét használtam (LORBERER 2001), harmadik modellréteg tetejéig lett beépítve a modellbe. A koncepcionális



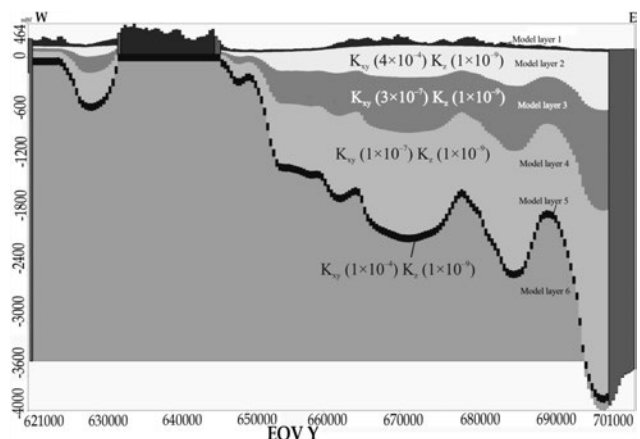
4. ábra. Négyréteges modell; 1 – talajvíztartó réteg; 2 – paleogén–neogén vízrekesztő réteg; 3 – fő karsztvíztartó réteg; 4 – üde karszt réteg

Figure 4. Four layered model; 1 – water-table bearing layer; 2 – Palaeogene-Neogene layer; 3 – main karst layer; 4 – not karstified, fresh carbonate rocks

modell alapján a harmadik modellréteg vastagsága 100 m, ezért a modellréteg alját a harmadik modellréteg tetejétől 100 m távolságra vettük (3. ábra). Ezekkel a lépésekkel alakítottuk ki a modellezési szempontból fontos modellrétegeket, az a felső talajvíztartó réteget, illetve a második főkarsztréteget.

Az áramlási modellezés során egyértelművé vált, hogy a megfelelő talajvíz-potenciálszint térbeli alakítása érzékeny a vastag paleogén–neogén modellréteg oldalirányú vízátteresztőképességének változására. Ennek következtében, ezt a vastag réteget további három különböző homogén, illetve anizotróp rétegre osztottuk (5. ábra). Így lehetővé vált a lokális és az intermedier áramlási rendszer közötti vízmegosztás és ezen keresztül a potenciálviszonyok befolyásolása.

Ahogy a koncepció modellben (3. ábra) látszik, a nyílt karszt területén a két tározóban a talajvízszint és a szabad tükrű karsztvízszint között éles a határ. Emiatt a nyílt karszt környezetében, a modellfuttatás során száraz cellák alakultak ki. Így a két rendszer (karszt- és talajvíztartó) közötti



5. ábra. Hatréteges modell, a paleogén–neogén modellréteg bontása további három homogén, illetve anizotróp 2-dik, 3-dik, 4-dik rétegre

Figure 5 Six layered model, the Palaeogene-Neogene complex model layer was split to three homogeneous and anisotropic layers as 2nd, 3rd and 4th model layers

éles határ kezelésére a nyitott karszt térrészt az első és a további három paleogén–neogén modellrétegben, inaktív cellákkal határoltuk le (4. ábra). A modellháló celláinak mérete 400×400 méter, amelyek 188 sorba és 190 oszlopba rendeztük.

A modell kezdeti és peremfeltételei

A modell kezdeti feltétele („initial head”) az 1950-es évek előtti termelés nélküli, és eredeti állapotnak tekinthető karsztvízszint, amihez CSEPREGI (2007) által szerkesztett a Dunántúli-középhegység főkarsztvíztárolójának eredeti állapotára vonatkozó térképét vettük alapul. A határfeltételek a következők: az első modellréteget drénként és négy forrást (Rác-Nagy forrás, Lukács-Király-forrás, Lukács-forrás, Esztergom-forrás) állandó nyomásúként („constant head”) definiáltunk. Az első modellrétegen a Duna hatását a drén peremfeltétel biztosítja.

Tekintettel arra, hogy a tanulmányozott terület határait a Dunántúli-középhegység határa adja, a modell északi, nyugati és keleti peremeit áramlásmentesnek („no-flow”) határoztuk meg. Bár ismert, hogy a vizsgált terület pilisi és dunazugi részein a bányászati víztermelések nyomáscsökkentő hatása jelentkezett, de úgy ítéljük meg, hogy a vizsgálatunk tárgyát képező, a budapesti források vízminőségét meghatározó áramlási rendszert ez nem befolyásolta alapvetően. Így a modell oldalperemei áramlásmentesnek definiálhatók.

A modell alsó határa a triász alaphegység és a rossz vízvezető perm rétegek között húzódik.

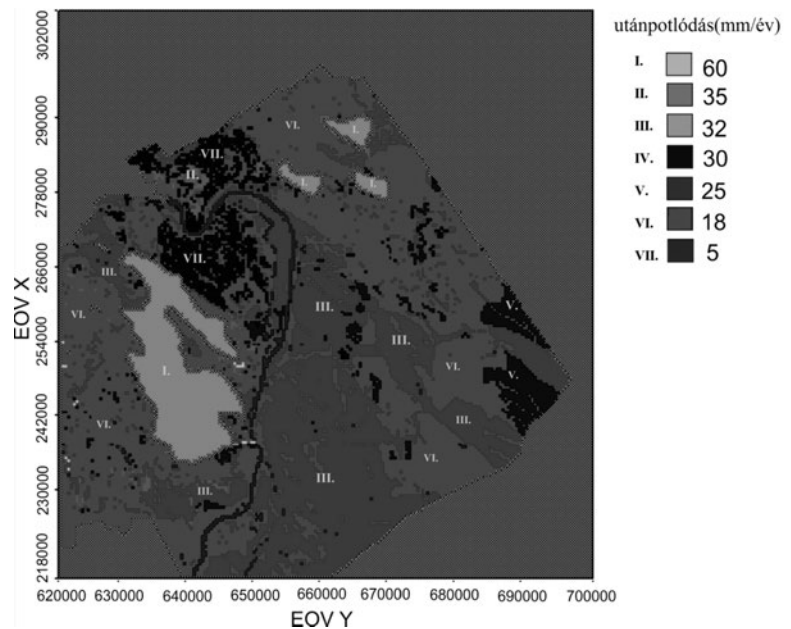
Fő utánpótlódási és megcsapolási viszonyok leírása

Karsztos beszivárgás történhet közvetlenül a karsztfelszínen vagy vékony fedő rétegen keresztül, így ebben a munkában a nyílt karszt területeit és a vékony fedővel borított területeket együtt, mint nyílt karszt beszivárgási területet definiáltuk. Ehhez minden karsztos területet, ami a 100 mBf fölött esik, nyíltkarszt beszivárgási területnek határoztunk meg.

A karszt fő megcsapolásai az ismert langyos és meleg karsztforrások, szökevényforrások, a fedőrendszer megcsapolásai a felszíni vizek, talajvíz- és repedésvízforrások, esetenként felszínközeli párolgó talajvizes allúviumok, mocsaras, lápos területek.

A beszivárgás számítása

A terület nagysága és földtani bonyolultsága miatt nem lehetett egységes utánpótlódási értéket megadni, így külön utánpótlódási zónákat hoztunk létre a MÁFI által szerkesztett



6. ábra. Utánpótlódási zónák az egyréteges homogén modellben. A zónák lehatárolása a MÁFI által szerkesztett 1:100 000 földtani térkép alapján készült (GYALOG et al. 2005)

Figure 6. Recharge map; recharge zones were assigned a border based on the 1:100 000 scale covered surface geological map published by the Geological Institute of Hungary (GYALOG et al. 2005)

1: 100 000 fedett földtani térkép alapján (GYALOG et al. 2005) (6. ábra).

Itt kell újra megemlíteni, hogy a 100 mBf terület a nyíltkarszt térrészének definiáltuk, és inaktív cellákkal határoltuk le.

A „trial and error” módszer alkalmazásával 5 és 60 mm/év közötti beszivárgási érték mellett (6. ábra), 68 000 m³/nap hozamot biztosítottam a főkarsztrétegben, ami közel áll GÖLZ (1982) által megadott 67 000 m³/nap a 15 °C-nál melegebb vizet adó kutak és források összhozamához.

Hidraulikai paraméterek

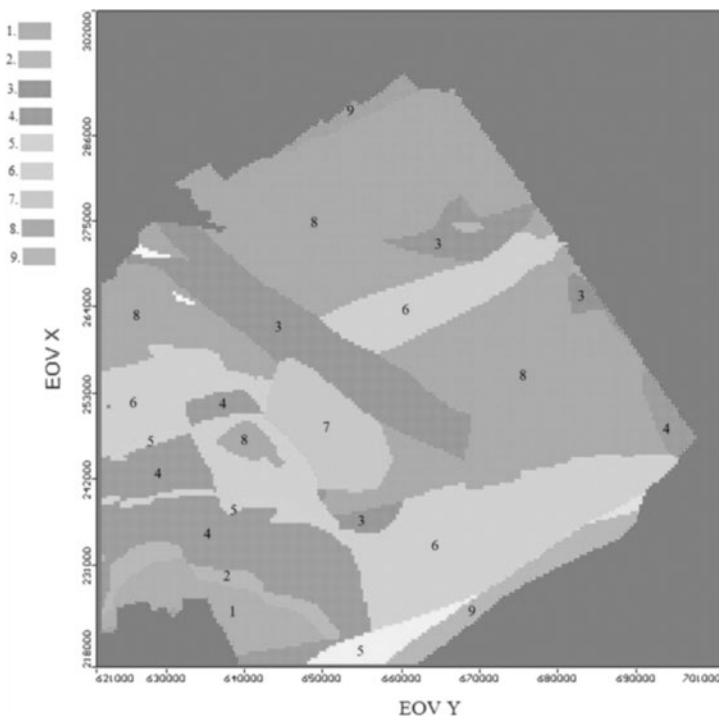
A rétegek hidraulikai tulajdonságait a réteg transzmisszibilitása (m²/nap), a tározási és a szivárgási tényezők (m/nap) határozzák meg, amelyek modellbeli értékei a még természetesnek tekinthető, 1950-es években mért karsztvízszintek és forráshozamok értékeivel lettek pontosítva (kalibrálva).

A felső modellréteget a szivárgási tényezőjének meghatározása céljából — a bonyolult földtani felépítés miatt — külön földtani zónákra, azaz különböző vezetőképességekkel rendelkező részekre osztottuk. A földtani zónákat a földtani térkép (1:100 000) alapján különítettem el és „trial and error” módszer alkalmazásával határoztuk meg a szivárgási tényezőket. A talajvizek esetében a számított vízszinttérképet az állandó vízfolyások térképével vetettük össze. A kalibráció itt arra irányult, hogy a számított vízszint esetében, a vízfolyások alakmódosító (vízáramlást módosító) hatása jelentkezzen.

A főkarszt modellréteg szivárgási tényezőjének meg-

határozása a MÁFI által szerkesztett 1:100 000 prekainozoos alaphegységtérkép segítségével történt, amely alapján elkülönítettük a különböző vízvezető zónákat (7. ábra, I. táblázat). Ezen felül, a Budapest északi és középső zónájában elhelyezkedő kutak körül még jobb vízvezető zónát határoltunk le (7. ábra 7-es színskála).

A vastag paleogén–neogén komplex modellréteg három külön homogén anizotróp rétegből áll (5. ábra). Tekintettel arra, hogy a fedőképződményekben a vertikális kapcsolat nagyságrenddel kisebb, mint a főkarsztárolóban, így a vertikális szivárgási tényező értéke itt három nagyságrenddel kisebb, mint a főkarszt modellrétegben ($K_z = 1 \times 10^{-9}$).



7. ábra. A főkarszt modellrétegben (az ötödik modellréteg) elkülönített szivárgási zónák (1–9), mely a MÁFI által szerkesztett 1:100 000 Prekainozoos földtani térkép alapján készült

Figure 7. The Geological zones of main karst model-layer (fifth model-layer) separated with different hydraulic conductivities (1–9), based on 1:100 000 scale Pre-Cenozoic geological map published by the Geological Institute of Hungary

A vízháztartási vizsgálatok (zonebudget)

Vízháztartási számítások alapján, a teljes tanulmányozott területen beszivárgott víz (283 677 m³/nap) 76%-a a felső modellrétegen, a lokális áramlási rendszeren keresztül, míg 24%-a a kutak és források összhozamaként kerül újra felszínre. A főkarsztrétegből kitermelt langyos-meleg víz összhozama 68 401 m³/nap, azaz beszivárgott víz 24%-a. Ez az érték közel van a GÖLZ által megadott 15 °C-nál melegebb vizet adó kutak és források összhozamához, ami 67 000 m³/nap.

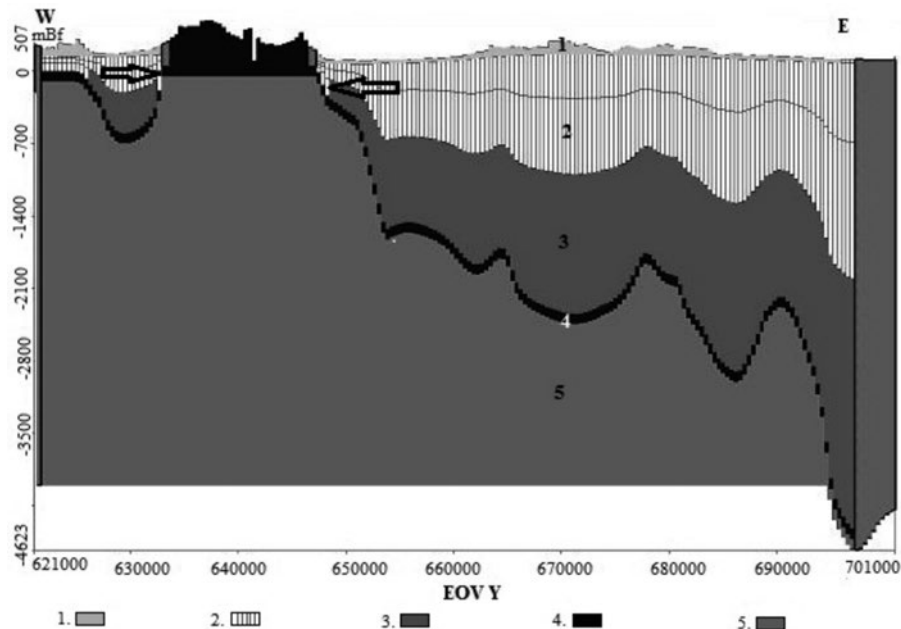
A vízmérlegszámításnál, azért hogy érthetőbbé váljon a karszt utánpótlódása a rossz vízvezető réteg felől, a paleogén–neogén réteget kettéosztottuk. Így a két víztartó réteg között elhelyezkedő vastag, összességében rossz vízvezető képességű paleogén–neogén üledékes összletet az alaphegység térképen megrajzolt –500 méteres mélységű izovonal alapján külön felső és alsó zónára különítettük el (8. ábra). Ezzel a fedőréteg felső és alsó zónája és a karszt közötti kapcsolatot külön is értékelni tudjuk. Feltételezésünk az volt, hogy ahol a fedőréteg vékonyabb, mint 500 m, ott a felszínről a fedőrétegen keresztül az utánpótlódás közvetlenebb. Az 500 méternél vastagabb paleogén–neogén fedő esetén már csak az abban tárolt idős vizek táplálásával számolhatunk.

Így egyértelművé vált, hogy a főkarszt modellréteget közel ugyanannyi mennyiségű vízzel táplálja a paleogén–neogén komplex modellréteg felső zónája (8401,5 m³/nap), mint az alsó (7779,8 m³/nap), annak ellenére, hogy az utóbbival az érintkezési felület sokkal jelentősebb. Ezzel igazoltuk, hogy a föld felszínére jutó szennyeződés elérve a paleogén–neogén második modellréteget a felső zóna peremén ugyanakkora mértékben áramlik a karsztároló felé, mint a második modellréteg mélyebb zónája felé. Ily módon a modell szimulálta azt az ismertényt, hogy a szennyező anyag a vékonyabb fedő réteg pereme mentén bekerülhet a karsztvíz-áramlási rendszerbe.

I. táblázat. Főkarszt modellrétegében elkülönített zónák szivárgási értékei

Table I. Hydraulic conductivities of separated geological zones of main karst model layer

Szivárgási zónák	Képződmények	$K_{x,y}$ m/s	K_z m/s
1	Felső-perm sekélytengeri karbonátos és evaporitos összlet	3×10^{-4}	1×10^{-6}
2	Alsó-triász sekélytengeri finom sziliciklasztos és karbonátos összlet	2×10^{-4}	1×10^{-6}
3	Felső-triász–alsó-jura platform fáciesű mészkő	1×10^{-4}	1×10^{-6}
4	Ladin–karni platform fáciesű dolomit	1×10^{-5}	1×10^{-6}
5	Karni medence fáciesű márga és mészkő	1×10^{-4}	1×10^{-6}
6	Karni–nori platform fáciesű dolomit	1×10^{-4}	1×10^{-6}
7	Felső-triász–alsó-jura platform fáciesű mészkő és nori–rhaeti és legsó-jura medence fáciesű mészkő, dolomit	3×10^{-4}	4×10^{-6}
8	Felső-triász–alsó-jura platform fáciesű mészkő	1×10^{-4}	1×10^{-6}
9	Középső-jura olisztróma-melanzs	1×10^{-4}	1×10^{-6}



8. ábra. A vízhozartás számításához elkülönített zónák Ny-K-i szelvényben

1 – talajvíztartó zóna; 2 – a paleogén-neogén komplex modell-rétegcsoport felső zónája; 3 – a paleogén-neogén komplex modell-rétegcsoport alsó zónája; 4 – főkarszt; 5 – üdekarszt zóna. A nyílak a főkarsztot tápláló felületet jelöli a paleogén-neogén réteg felső zónájából

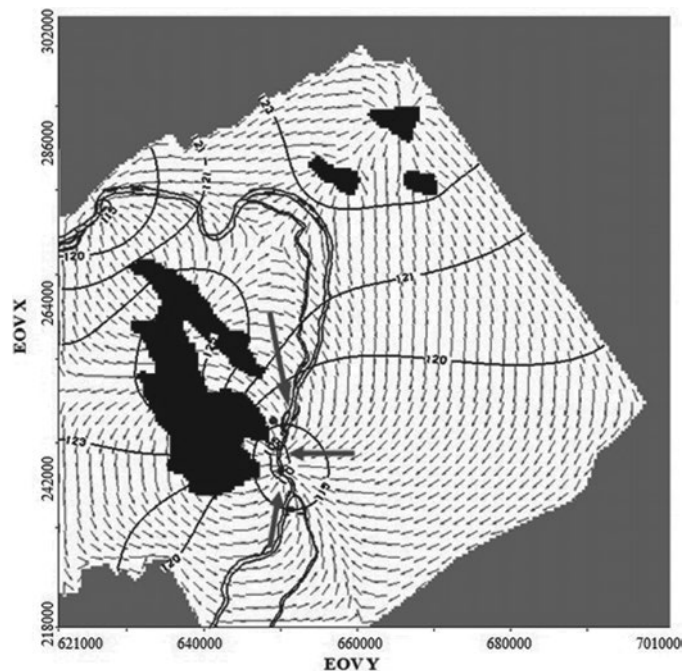
Figure 8. Separated layers for calculating the zonebudget of model domain (W-E caption)

1 – water-table bearing layer; 2 – Upper zone of Palaeogene-Neogene complex aquitard layer; 3 – lower zone of Palaeogene-Neogene complex aquitard layer; 4 – Main karst layer; 5 – Not karstified rocks. The arrows show the contact area of upper zone of karst covering layer with the main karst layer

A modell eredményei

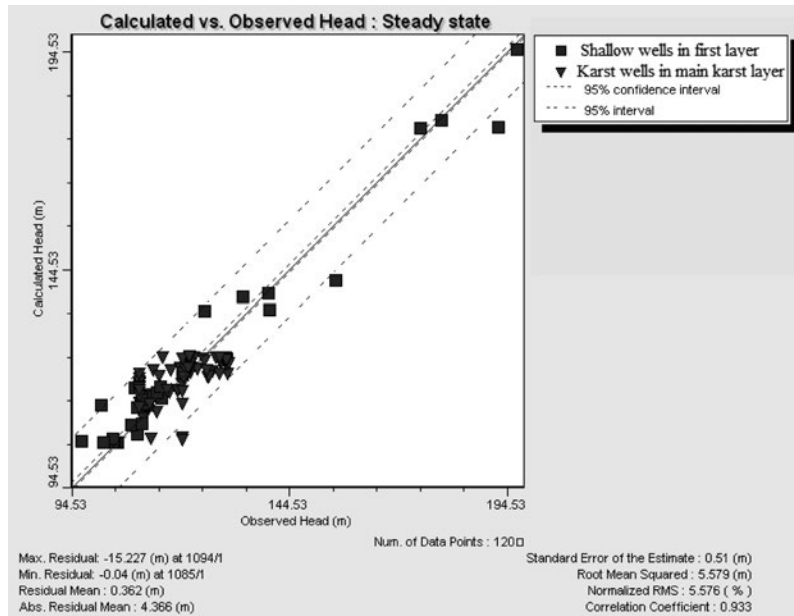
A modell ellenőrzésére és a rendszer kalibrációjához a felső víztárolóban (talajvíztartó modellréteg) 24 talajvíz- és megfigyelőkútban, míg a főkarszt modellrétegben 64 termelő és megfigyelő karszt-kútban mért vízszintértékeket vettünk figyelembe. A modellezés futtatási eredményeként a főkarsztrétegben számított karsztvízszint az utánpótlási területek környékén 125 mBf (9. ábra), amely megegyezik a Pilisből ismert 120–125 mBf és a Budai-hegységből ismert 120–130 mBf karsztvízszinttel (LORBERER et al. 1992, CSEPREGI 2007). Továbbá a 9. ábrán szürke nyilakkal jelölt áramlási irányok alapján kimutatható, hogy a termásvíz Budapest területén három irányból áramlik fel a források felé, azaz északról a langyos vizet adó kutak felé, délnyugatról a Gellért-forráscsoport felé és keletről a városligeti és a Margit-szigeti kutak vonalában, a Rózsadomb meleg vizet adó források kútjai felé. Így ezen áramlási irányok alapján kirajzolódott az első ábrán már leírt három külön áramlási zóna, azaz az északkeleti langyos vizet adó zóna, a déli meleg vizet adó zóna és a középső zóna, ahol a langyos és a meleg vizek keverednek.

A 10. ábra az első modellrétegben és a főkarszt modellrétegben számított és mért potenciálszintek korrelációját mutatja be. A 0,93 korrelációs együttható érték igazolja, hogy négy pont kivételével az összes



9. ábra. Szerkesztett karsztvízszint térkép (főkarszt rétegben). fekete szín: nyílt karszt rész; a szürke nyílak a három főbb áramlási pályát jelölik Budapest területén

Figure 9. Karst water levels of main karst model layer; The grey arrows show the main three flow paths in Budapest; Recharge areas are indicated by black colour



10. ábra. Mért és számított potenciál értékek (hatréteges modell)

N (kutak száma) = 120; RMS (négyzetes középérték) = 5,6 m; nRMS (normált négyzetes középérték) = 5,58 %; r_2 (korrelációs együttható) = 0,93

Figure 10. Model results of calculated versus observed head

megfigyelési pont vízszintértéke a 95%-os konfidencia intervallumon belül van. A nagyobb eltérést mutató két talajvízszint- és két karsztvízszint-megfigyelő kút esetén, ahol a számított vízszintértékek alacsonyabbak a mértnél, az eltérés oka részben a helyi domborzatváltozás mértéke és a modellcella mérete (400×400) közötti jelentős különbség, illetve nem zárható ki a hibás adatrögzítés okozta eltérés sem.

A normalizált hiba (nRMS = 5,58) 6-nál kisebb értéket mutat, ami nagyon jó eredménynek tekinthető, a számított és mért potenciálszintek jó egyezésére utal mind a két víztárolóban (főkarszt- és talajvíztartó-réteg).

Diszkusszió és következtetések

A tanulmányozott területre, természetes állapotot jól reprezentáló permanens állapotra 3 dimenziós numerikus modell készült. A jelen állapotában készült modell nem csak a hidraulikai paraméterek, hanem a két tározót felépítő

közvettesek és azok földtani viszonyai alapján történt lokális és regionális modell-futtatás kalibrációjának az eredménye. A modell eredményei:

— A két külön víztartó réteg (főkarszt és talajvíztartó-réteg) definiálásával elkülönült a mély áramlású karsztvíz-rendszer a sekély vízáramlási (talajvíz-) rendszertől.

— A főkarsztrétegben a modell által számított potenciáeloszlás alapján kirajzolódott a budapesti területen jelölt három jelentősebb áramlási pálya.

— A terület vízháztartási számításai alapján kiderült, hogy az első modellréteget elérő összes beszivárgás (283 677 m³/nap) 76%-a a felső modellrétegen a lokális áramlási rendszeren keresztül drénként és 24%-a a termáلكutak és források összhozamként újra felszínre kerül. Az utóbbi értéke, azaz 68 401 m³/nap közel áll a GÖLZ által megadott 15 °C-nál melegebb vizet adó kutak és források összhozamához, ami 67 000 m³/nap.

— A vízmérleg számításánál a paleogén–neogén komplex modellréteget két, felső és alsó zóna elkülönítésével sikerült számszerűsíteni, így a paleogén–neogén modellréteg felső zónájának peremén ugyanakkora mértékben áramlik a víz a karsztárazó felé, mint a második modellréteg mélyebb zónája felé, annak ellenére, hogy az utóbbival az érintkezési felület sokkal jelentősebb. Ily módon a modell alátámasztotta azt az ismert tény, hogy a szennyező anyag a fedő réteg felső peremén rövid idő alatt bekerül a karsztvíz-áramlási rendszerbe.

Köszönetnyilvánítás

Ez a munka TÓTH György szakmai vezetésével „Budai karszrendszer utánpótlódási viszonyainak hidrodinamikai vizsgálata vízgeokémiai adatok” című doktori kutatás részeként készült. Köszönöm a tanulmány véleményezését és a szakmai tanácsokat Dr. SZÉKELY Ferencnek és Dr. SZANYI Jánosnak.

Irodalom — References

- ALFÖLDI L., BÉLTEKEY L., BÖCKER T., HORVÁTH J., KESSLER H., KORIM K., ORAVECZ J. & SZALONTAI G. 1968: Budapest hévizei. — VITUKI kiadvány, Budapest, 365 p.
- ALFÖLDI L. 1979: Budapesti hévizek — Thermal waters of Budapest. — VITUKI Közlemények–Proceedings 20, Budapest, 102 p.
- ALFÖLDI L. 1981: A budapesti geotermikus áramlási rendszer modellje. — *Hidrológiai Közöny* 1981/9, 7 p.
- CSEPREGI A. 2007: A karsztvíztermelés hatása a Dunántúli-középhegység vízháztartására. — In: ALFÖLDI L. & KAPOLYI L. (szerk.): *Bányászati karsztvízszint-süllyesztés a Dunántúli-középhegységben*. MTA Földrajztudományi Kutatóintézet kiadványa, Budapest, 103–113.

- ERŐSS, A., MÁDL-SZÓNYI J. & CSOMA É. A. 2008a: Characteristics of discharge at Rose and Gellért Hills, Budapest, Hungary. — *Central European Geology* **51/3**, 267–281.
- ERŐSS, A., CSOMA, É. A. & MÁDL-SZÓNYI, J. 2008b: The effects of mixed hydrothermal and meteoric fluids on karst reservoir development, Buda Thermal Karst, Hungary. — In: SASOWSKY, I. D., FEAZEL, C. T., MYLORIE, J. E., PALMER A. N. & PALMER, M. V. (eds): Karst from recent to reservoirs. *Special Publication 14*, Karst Waters Institute, Leesburg, Virginia, USA, 57–63.
- ERŐSS, A., MÁDL-SZÓNYI, J., SURBECK, H., HORVÁTH, Á., GOLDSCHIEDER, N. & CSOMA A. É. 2012, Radionuclides as natural tracers for the characterization of fluids in regional discharge areas, Buda Thermal Karst, Hungary. — *Journal of Hydrology* **426–427**, 124–137.
- FODOR L., MAGYARI Á., FOGARASI A. & PALOTÁS K. 1994: Tercier szerkezetfejlődés és késő paleogén üledékképződés a Budai-hegységben. A Budai-vonal új értelmezése. — *Földtani Közlöny* **124/2**, 139–305.
- GÖLZ B. 1982: A Dunántúli-középhegység forrásainak természetes hőteljesítménye. — *Földrajzi Értesítő* **31**, 427–447.
- GYALOG L., BUDAI T., CHIKÁN G., IVANCSICS J., KAISER M., KOROKNAI B., KOVÁCS S., MAIGUT V., PELIKÁN P., SIKHEGYI F. & TURCZI G. 2005: *Magyarország fedett földtani térképéhez 1:100 000*, Commentary to Geological Map of Hungary, 1:00 000 (In Hungarian). — Magyar Állami Földtani Intézet, 189 p.
- HAAS J., 1988: A Dunántúli-középhegység felsőtriász karbonátos kőzeteinek fácies elemzése a Lofér-ciklusok jellegei alapján. — *Földtani Közlöny* **118**, 10–108.
- HAAS J. 1994: *Magyarország földtana. Mezozoikum*. — Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 119 p.
- HEINEMANN Z. & SZILÁGYI G. 1977: A Dunántúli-középhegység főkarsztvíz-rendszerének szimulációja. — *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat* **110/11**, 750–758.
- KELE S., SCHEUER GY., DEMÉNY A., CHUAN-COU SHEN & HONG-WEI CHIANG 2011: A Rózsadomb (Budapest) édesvízi mészköveinek U-Th-sorozatos kormeghatározása és stabilizotóp-geokémiai vizsgálata. — *Földtani Közlöny* **141/3**, 293–312.
- KORPÁS. L. 1981: Oligocene – Lower Miocene formations of the Transdanubian Central Mountains in Hungary. — *MÁFI Évkönyv* **64**, 140 p.
- KORPÁS, L. 1998: *Paleokarszt studies in Hungary*. — Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 139 p.
- KOVÁCS J. & MÜLLER P. 1980: A Budai-hegység hévizes tevékenységének kialakulása és nyomai. — *Karszt és Barlang* **1980/2**, 93–98.
- KOVÁCS GY., ÁDÁM O., BEKE I., BÖCKER T., EGRSZEGI GY., HEINEMANN Z., HORVÁTH J., OTTLIK P., SCHMIEDER A., SZEBÉNYI L. & SZILÁGYI G. 1979: *A Dunántúli bányászat karsztvízszint- süllyesztése és a termálvíz ellátás kérdései*. — Budapest, Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság, 101 p.
- LORBERER Á. 1984: *Budapest környékének geotermikus térképe. M=1:100 000*. — VITUKI, Budapest.
- LORBERER Á. 2001: *A Dunántúli-középhegység karsztvízszint térképe ÉK-i rész (mBf). M= 1:200 000*. — VITUKI, Budapest.
- LORBERER Á. & IZÁPY-WEHOVSZKY E. 1992: *Map of the karstwater-table of the Transdanubian Range. Scale 1:200,000*. (in Hungarian) — Vízgazdálkodási Tudományos Központ Vízrajzi Intézete, Budapest.
- MAGYARI Á. 1996: Eocén szinszediment tektonikai jelenségek és üledékképződésre gyakorolt hatásaik a Budai-hegységben. — PhD Thesis, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 288 p.
- MINDSZENTY A. (szerk.) 2013: *Földtani értékek és az ember. Városgeológiai tanulmányok („In urbe et pro urbe”)*. — Budapest, ELTE – Eötvös Kiadó, 311 p.
- SÁRVÁRY I. 1995: A budapesti termálkarszt kitermelhető vízkészleteinek felülvizsgálata. — *Hidrológiai Közlöny* **75/2**, 87–93.
- SCHAFARZIK F. 1928: Visszapillantás a budai hévforrások fejlődéstörténetére. — *Hidrológiai Közlöny* **1**, 9–14.
- VENDEL M. & KISHÁZI P. 1964: Összefüggések melegforrások és karsztvizek között a Dunántúli-középhegységben megfigyelt viszonyok alapján. — *MTA Műszaki Tud. Oszt. Közleménye* **32**, 393–417, **33**, 205–234.
- WEIN Gy. 1977: *A Budai-hegység tektonikája*. — MÁFI alkalmi kiadványa, Budapest, 76 p.

Kézirat beérkezett: 2014. 01. 20.

